Ciencia Hoy volumen 20 número 119 octubre - noviembre 2010

Alejandro A Bianchi, Ana Paula Osiroff, Carlos F Balestrini

Servicio de Hidrografía Naval

Alberto R Piola

Investigador del Conicet en el Servicio de Hidrografía Naval

Hernán Isbert Perlender

Servicio Naval de Investigación y Desarrollo

Atrapando CO_2 en el mar patagónico

Buque de investigación *Puerto Deseado*, utilizado en los programas de cooperación entre la Argentina y Francia. Foto Conicet

El CO_2 y el cambio climático

Los gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran presentes en la atmósfera terrestre en concentraciones bajas, pero tienen gran importancia climática ya que atrapan parte de la radiación que emite la superficie terrestre hacia el espacio exterior y por lo tanto tienden a aumentar la temperatura del planeta. Uno de los factores que intervienen en el cambio climático es la emisión antropogénica de estos GEI, a cuyo incremento se atribuye el aumento de cerca de 1°C observado en la temperatura media de la atmósfera en los últimos 150 años. Para evaluar la magnitud de este cambio de temperatura, tengamos en cuenta, por ejemplo, que durante la última glaciación, cuyo máximo ocurrió hace unos 18.000 años, la temperatura media global no descendió más que unos 2 a 4°C, pero tuvo efectos extraordinarios para la vida en la Tierra, la extensión de los hielos marinos y continentales, la circulación general de la atmósfera y los océanos e, incluso, para la geografía del planeta.

Pese a que solo constituye un 0,04% de la masa de la atmósfera, el dióxido de carbono (CO_2) desempeña un papel fundamental en su balance energético. La concentración de CO_2 en la atmósfera depende de grandes cantidades intercambiadas entre esta, la tierra, los océanos y

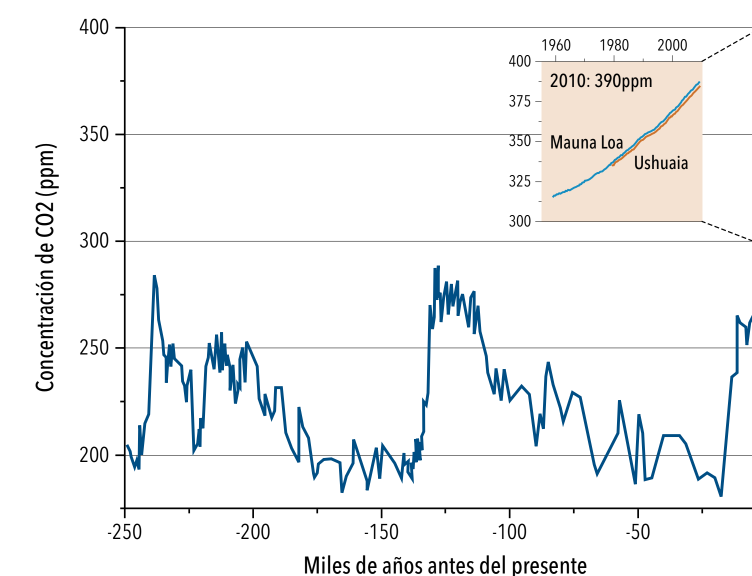


Figura 1. Evolución temporal de la concentración de CO_2 en la atmósfera en los últimos 250.000 años. Nótese que el máximo actual supera los máximos relativos ocurridos anteriormente (durante períodos glaciales). En la parte superior derecha, se observa la evolución en el tiempo de la concentración de CO_2 en la atmósfera en la isla de Mauna Loa (Hawai) en los últimos cincuenta años. La tendencia de aumento a partir de 2000 es de más de 2,1ppm/año. También se observa la concentración de CO_2 en Ushuaia, donde se advierte la misma tendencia.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

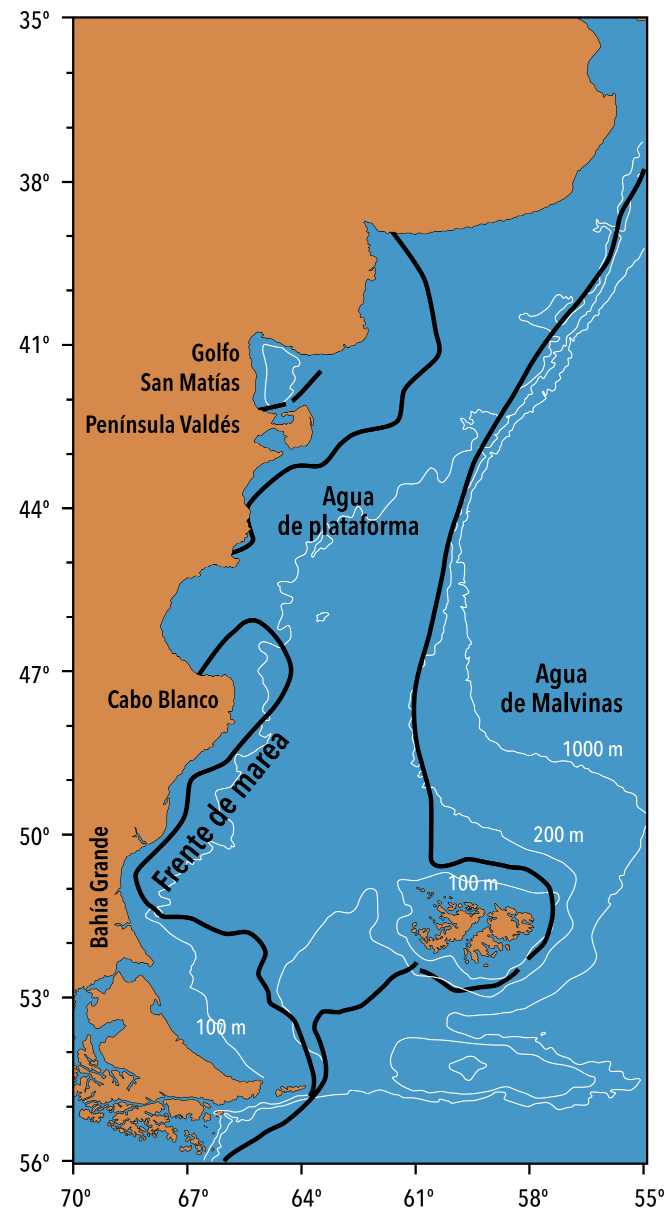


Figura 2. Posición del frente de marea y del frente de talud en el mar patagónico.

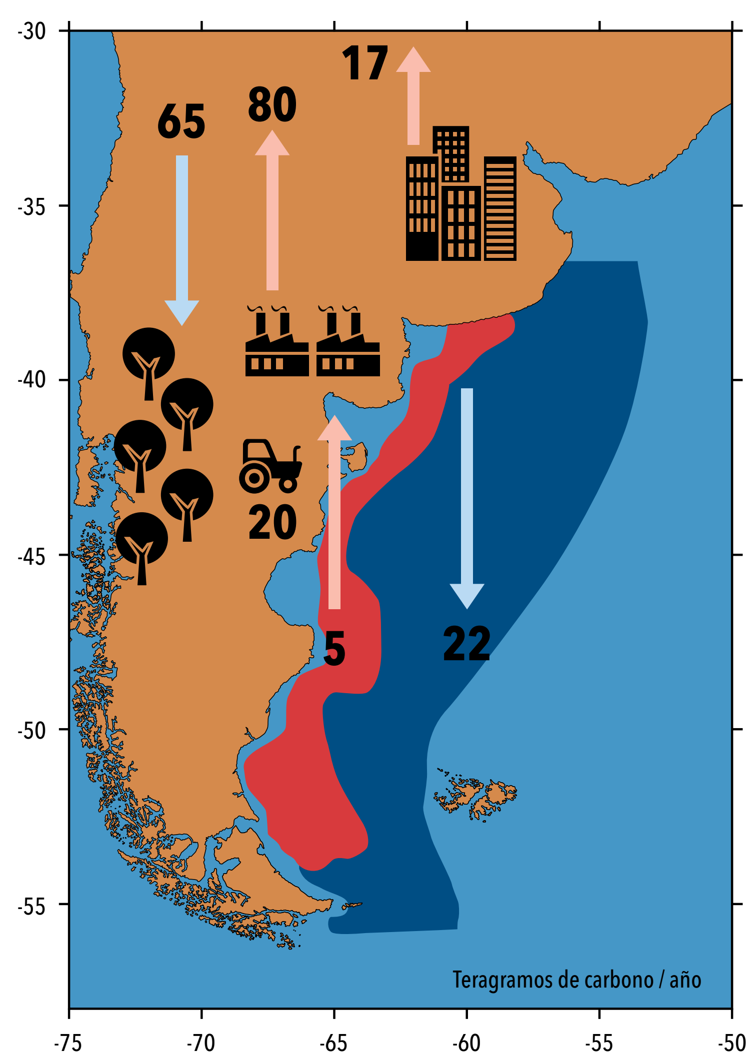


Figura 3. Esquema de las principales fuentes de emisión en la Argentina (flechas hacia arriba, color rosa) y de captura o sumidero de CO2 (color celeste), según sus orígenes, en Tg (10^{12} g) de carbono. El uso residencial (edificios), el cambio en el uso del suelo (tractores) y la industria (chimeneas) son las principales fuentes de emisión, mientras que la vegetación (bosques) y el océano son las que capturan el CO2 atmosférico. Puede observarse que todo el CO2 emitido en el uso residencial en el país (que incluye la generación de electricidad, combustión de gas, etcétera) es equivalente a lo capturado por el mar patagónico.

la biota. La quema de combustibles fósiles desde el inicio de la revolución industrial, los cambios en el uso de la tierra a través de la deforestación, la adaptación de la tierra para la agricultura y otras actividades humanas han provocado el aumento del CO2 en la atmósfera de 280 a más de 380 partes por millón (ppm) a nivel global, lo cual se observa en la figura 1.

La importancia del océano en el ciclo del carbono

El océano contiene aproximadamente cincuenta veces más CO2 que la atmósfera y el intercambio anual de CO2 entre ambos medios es, en términos absolutos, quince veces mayor que el producido en el mismo lapso por la utilización de combustibles fósiles y la deforestación. Consecuentemente, la concentración de CO2 en la atmósfera está gobernada principalmente no solo por los continentes sino también por los reservorios dinámicos representados por los océanos. Por lo tanto, para entender la naturaleza de los cambios de la concentración de CO2 en la atmósfera, es indispensable comprender de qué manera los procesos biológicos, físicos y químicos que tienen lugar en el océano determinan el sentido del intercambio entre el mar y la atmósfera.

En ausencia de otros procesos la concentración de CO2 en la superficie del mar tendería a equilibrarse con la concentración atmosférica y por lo tanto la concentración de CO2 en la superficie del mar presentaría un aumento similar al observado en la atmósfera. Sin embargo, varios procesos influyen sobre la concentración de CO2 en el mar y por ende en el ciclo de carbono.

La bomba biológica

Durante el proceso fotosintético las plantas emplean la luz solar para transformar carbono de la molécula de CO2 disuelto en carbono orgánico, siendo las algas marinas responsables de aproximadamente el 50% de la fotosíntesis planetaria. Por lo tanto, el consumo biológico de CO2 reduce la concentración del gas disuelto en el agua. En el océano, la mayor parte de este proceso se lleva a cabo en los primeros 100 metros de la columna de agua, donde la intensidad de la luz solar lo permite. Al mismo tiempo, la respiración de los animales y la descomposición de plantas y animales muertos son una fuente de CO2 en el mar y la mayor parte del carbono orgánico se descompone durante su hundimiento. Dado que la mezcla vertical en el mar está inhibida por la estratificación vertical (el agua profunda es más densa que el agua superficial), el regreso del CO2 a la superficie solo ocurre en algunas regiones donde el agua profunda asciende (aguas de surgencia). El carbono puede ser almacenado en el océano profundo y en los sedimentos marinos por largos períodos. Este movimiento de CO2 desde la superficie hacia el océano profundo es conocido como bomba biológica.

El flujo mar-atmósfera de CO2

El flujo de CO2 entre el océano y la atmósfera puede calcularse como el producto entre su solubilidad en agua de mar, la intensidad del viento y la diferencia de concentraciones de dicho gas entre el aire y el agua. En la práctica, las concentraciones dependen de las 'presiones parciales' en cada uno de los fluidos, o la presión que el CO2 ejercería si ocupara todo el volumen del fluido.

Dado que el CO2 en la atmósfera está bien mezclado, su presión parcial varía en un rango muy estrecho respecto de su valor medio (~5%). Esto implica que el aumento observado en Mauna Loa (Hawai), por ejemplo, es similar al observado en cualquier otro lugar en la Tierra, como se observa en la figura 1. Sin embargo, la presión parcial en la superficie del mar varía entre 200 y 530 microatmósferas (μatm), según las estimaciones más recientes. Por lo tanto, el sentido y la magnitud del flujo de CO2 entre el mar y la atmósfera son determinados mayormente por la magnitud de la presión parcial del gas en el océano.

La importancia de los mares costeros

El rol de los océanos marginales o costeros en la absorción del CO2 es tema de discusión. Los mares que se extienden sobre las plataformas continentales y sus márgenes son una de las áreas biogeoquímicamente más activas de la biósfera, ya que reciben masivas descargas continentales de carbono y nutrientes que, a su vez, intercambian con la atmósfera y el océano abierto. Consecuentemente, las zonas marginales representan importantes contribuciones al ciclo del carbono. Por otra parte, el carbono es el elemento base en la construcción de vida. Las plantas terrestres y las algas marinas capturan CO2 y convierten esta forma gaseosa del carbono en productos orgánicos, como carbohidratos, proteínas,

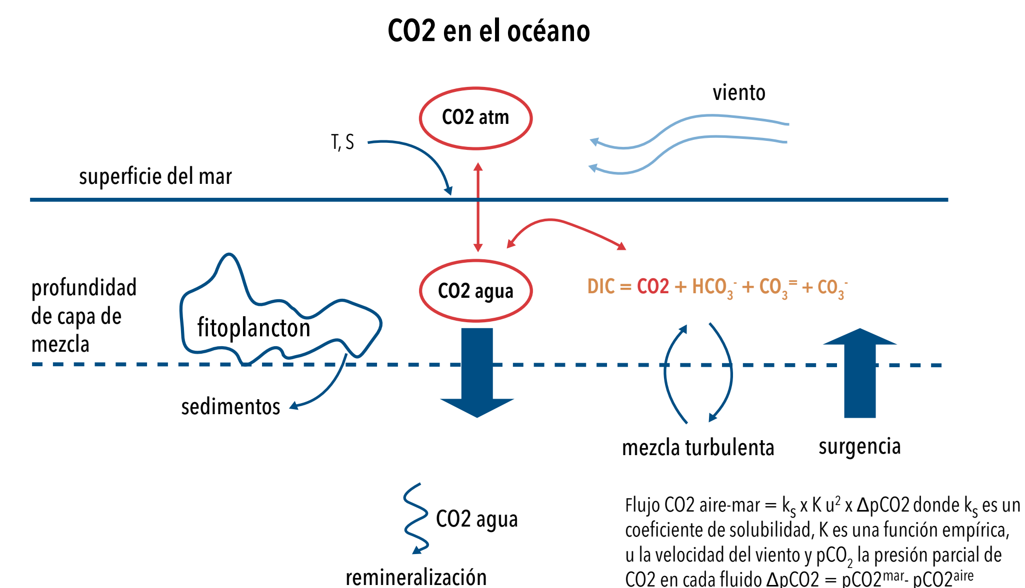


Figura 4. El esquema muestra los principales factores y procesos que intervienen en el ciclo del carbono en el océano.
T, S son la temperatura y la salinidad en la superficie del mar que determinan la solubilidad del CO2 como gas en el agua.
CO2 agua es la forma acuosa del dióxido de carbono disuelto.
DIC es el carbono inorgánico disuelto. El DIC en el mar está compuesto por CO2, el ácido carbónico (HCO_3^-), los carbonatos (CO_3^-) y bicarbonatos (CO_3^{2-}).
Las flechas gruesas indican el ascenso (surgencia) y el descenso de las aguas, mientras que las delgadas muestran el hundimiento del fitoplancton que desciende como detrito hacia los sedimentos del fondo. Parte del fitoplancton puede remineralizarse. Otro proceso involucrado es la mezcla turbulenta entre las masas de agua.

lípidos, etcétera. La mayor parte de la vida marina, desde las microalgas hasta las más importantes pesquerías, se desarrolla en los mares marginales.

Las mediciones de flujos aire-mar de CO2 realizadas en distintos mares costeros y luego extrapoladas al total de las áreas marinas marginales, que representan apenas un 7% del océano global, indican que alrededor del 20% de la captura total de este GEI en el mar se produciría en dichas zonas. Existen, sin embargo, importantes discrepancias en estas estimaciones debido al aún pobre conocimiento del balance de CO2 en esas áreas. Entre estos mares se destaca el mar patagónico, una de las más extensas plataformas continentales, que abarca una superficie de más de un millón de km^2.

Los frentes oceánicos en el mar patagónico

La distribución del fitoplancton y de muchas especies marinas es bastante heterogénea y las mayores concentraciones parecen estrechamente ligadas a los llamados frentes oceánicos. Al igual que en la atmósfera, los frentes son regiones donde se observan cambios relativamente abruptos en las propiedades físicas y/o biogeoquímicas del mar en distancias relativamente cortas. En el mar patagónico existen principalmente dos tipos de frentes. Uno de ellos es el frente de talud (FT), que se encuentra entre las aguas de la corriente de Malvinas, que corre hacia el norte paralela al talud continental, y las aguas de plataforma, de menor salinidad (figura 2). Las mareas en la Patagonia son de las más energéticas del planeta y, por lo tanto, producen muy fuertes corrientes, que por fricción con el fondo marino mezclan verticalmente las aguas cercanas a la costa. A una cierta distancia de la costa, aumenta la profundidad y disminuye la velocidad de la corriente, por lo que la mezcla no es tan efectiva como para alcanzar toda la columna de agua. Consecuentemente se desarrolla estratificación vertical, en la que las aguas más calientes y livianas ocupan la parte superior de la columna de agua, mientras que las más frías y densas permanecen por debajo. La transición entre las aguas homogéneas y las estratificadas da origen, entre primavera y otoño, a los frentes de marea (FM), que son comunes en la boca del golfo San Matías, frente a la península Valdés, el cabo Blanco y en la zona de la bahía Grande.

El balance de CO_2 en el mar patagónico: observaciones y resultados

Programas científicos de cooperación entre la Argentina y Francia permitieron medir las diferencias de presión parcial de CO2 (pCO2) y estimar los flujos mar-aire del mismo gas sobre la plataforma continental patagónica y el talud continental adyacente. Las observaciones se obtuvieron a bordo del rompehielos *Almirante Irízar* y del buque oceanográfico *Puerto Deseado* entre marzo de 2000 y octubre de 2006. Los sistemas de medición de CO2 se observan en las figuras 5 y 6. También se llevaron a cabo determinaciones de clorofila (Cl *a*) y de la estructura térmica y de salinidad, que fueron analizadas especialmente en los frentes con el objeto de relacionar estas variables con el balance de CO2. Desde la primavera hasta el fin del otoño, las aguas costeras, mezcladas verticalmente, actuaron como una fuente de CO2 hacia la atmósfera, mientras que en el resto de la plataforma, especialmente en los frentes oceánicos, se verificaron fuertes hundimientos o sumideros de CO2 hacia el mar. Las mayores concentraciones de clorofila, que indican una mayor biomasa fitoplanctónica, se situaron en los sitios de mayor hundimiento de CO2, sugiriendo que la fotosíntesis representa uno de los principales procesos de captura de CO2 efectuada por el mar, resaltando la importancia de la 'bomba biológica'.

Para un desarrollo masivo del fitoplancton son necesarias ciertas condiciones ambientales. Entre estas, la luz, los nutrientes (nitratos, fosfatos, silicatos, etcétera) y una capa superior menos densa que las aguas más profundas son imprescindibles. Los flujos máximos de hundimiento de CO2, causados por la fotosíntesis realizada por las algas, se observan en la primavera debido al florecimiento del fitoplancton marino. En esta época del año abundan los nutrientes, comienza a haber estratificación y el período de luz disponible aumenta de manera significativa. Inversamente, durante el invierno, cuando los días son más cortos y la estratificación desaparece debido al enfriamiento de la capa superior, existe un equilibrio entre la emisión y la captura de CO2 en el mar. Los valores medios anuales del flujo de CO2 entre el mar y la atmósfera muestran una captura de CO2 por parte del océano muy por encima de los promedios correspondientes a otros mares. Estos valores indican que el mar patagónico secuestra cuatro veces más CO2 ($4 mmol \cdot C \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) que el promedio del océano global, en términos de balance anual, lo que la transforma en una de las regiones de mayor captura de CO2 del planeta.

El rompehielos *Almirante Irízar.*





Figura 5. Sistema de medición de las presiones parciales de CO2 en el agua de mar y en la atmósfera.



Figura 6. Un integrante del grupo de trabajo realizando determinaciones de alcalinidad y contenido total de CO2 en muestras de agua. El sistema puede realizar las mismas en forma automática durante la navegación de la superficie de mar, pero permite también su utilización para el análisis de laboratorio.

Discusión

Existen diversos caminos para la mitigación de los efectos del incremento antropogénico de los GEI. Los bonos de carbono son un mecanismo internacional propuesto en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones de GEI y sus consecuencias nocivas sobre el medio ambiente. El sistema ofrece incentivos económicos para las empresas privadas que contribuyan a la mejora de la calidad ambiental suprimiendo o disminuyendo la emisión GEI generada por sus procesos productivos, mientras que las que emiten más de lo establecido quedarían sujetas a un régimen de penalidades. De este modo se considera el derecho a emitir CO2 como un bien canjeable a un precio establecido en el mercado. Si bien la captura de dióxido de carbono realizada por el mar patagónico no es canjeable por bonos, la misma superaría los 600 millones de dólares anuales en el mercado antes descripto. En la figura 3, se observa un esquema de las emisiones y capturas de CO2 en la Argentina. Esto da otra medida de la magnitud del hundimiento de CO2 en nuestros mares.

A escala global la absorción oceánica neta de CO_2 está conduciendo a un aumento de la concentración de CO_2 y la de sus derivados inorgánicos, como el ácido carbónico, reduciendo el pH y causando la denominada acidificación del océano. La acidificación representa una amenaza para ciertas formas de vida marina, por ejemplo la decoloración y el deterioro de los corales que estaría asociado, en parte, al aumento del CO_2. En ausencia de otras fuentes o sumideros, la captura neta de CO_2 a través de la superficie observada durante un lapso de alrededor de siete años en el mar patagónico podría conducir a un aumento de la concentración del gas en el agua. Suponiendo que el CO_2 se distribuya en forma homogénea en el mar patagónico, la presión parcial del gas debería haber aumentado. Sin embargo, debido a las significativas variaciones interanuales y estacionales de CO_2, nuestras observaciones no permiten detectar con suficiente precisión la tendencia temporal. Si no existiera un aumento de CO_2, cabe preguntarse cuál es el destino del gas absorbido en el mar patagónico. ¿Es el exceso de CO_2 almacenado en el sedimento marino o 'exportado' al océano profundo?

Dada la magnitud de los intercambios de CO_2 observados en mar patagónico, estos resultados abren nuevos interrogantes de importancia ambiental y económica a nivel regional y global. CH

LECTURAS SUGERIDAS

ACHA EM, MIANZAN HW, GUERRERO RA, FAVERO M & BAVA J, 2004, 'Marine fronts at the continental shelves of austral South America: Physical and ecological processes', *Journal of Marine Systems*, 44 (1-2), pp. 83-105.

ACHA EM y Mianzan HW, 2006, 'Oasis en el océano', Ciencia Hoy, 16, Nº 92.

BIANCHI A, RUIZ PINO D, ISBERT PERLENDER HG, OSIROFF AP, SEGURA V, LUTZ V, CLARA ML, BALESTRINI CF & PIOLA AR, 2009, 'Annual balance and seasonal variability of sea-air CO_2 fluxes in the Patagonia Sea: Their relationship with fronts and chlorophyll distribution', *Journal of Geophysical Research*, 114, C03018, 11PP., doi:10.1029/2008JC004854

MULLER-KARGER FE, VARELA R, THUNELL R, LUERSSEN R, HU C & WALSH JJ, 2005, 'The importance of continental margins in the global carbon cycle', *Geophysical Research Letters*, 32, L01602, doi:10.1029/2004GL021346.

PALMA ED, MATANO RP & PIOLA AR, 2004, 'A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing', *Journal of Geophysical Research*, 109, C08014, doi:10.1029/2004JC002315.

ROMERO SL, PIOLA AR, CHARO M & EIRAS GARCÍA C, 2006, 'Chlorophyll-a variability off Patagonia based on SeaWiFS data', *Journal of Geophysical Research*, 111, C05021, doi:10.1029/2005JC003244

SARMIENTO JL & GRUBER N, 2006, 'Carbon Cycle, CO_2 and Climate', en *Ocean Biogeochemical Dynamics*, Princeton University Press, pp. 526.

TAKAHASHI T *et al.*, 2009, 'Climatological mean and decadal changes in surface ocean CO_2, and net sea-air CO_2 flux over the global oceans', *Deep-Sea Research*, II, 56, pp. 554-577.